



科学 专著：前沿研究

# 特种光纤 与光纤通信

王廷云 著



上海科学技术出版社

# 特种光纤 与光纤通信

王廷云 著

上海科学技术出版社

---

### 图书在版编目(CIP)数据

特种光纤与光纤通信 / 王廷云著. —上海: 上海科学技术出版社, 2016. 1

(科学专著. 前沿研究)

ISBN 978 - 7 - 5478 - 2826 - 7

I. ①特… II. ①王… III. ①光导纤维—研究②光纤通信—研究 IV. ①TQ342②TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 237393 号

---

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助

责任编辑 张毅颖 刘小莉

装帧设计 戚永昌

## 特种光纤与光纤通信

王廷云 著

---

上海世纪出版股份有限公司 出版  
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行  
200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co

上海中华商务联合印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 15 插页 4

字数 300 千字

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5478 - 2826 - 7/TN · 17

定价: 68.00 元

---

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

**科学** 专著：前沿研究

## 内 容 提 要

随着光纤通信技术的迅猛发展,具有特殊功能的特种光纤及其器件不断涌现,其应用已深入不同的信息行业,更是迅速渗透到社会生活的各个领域。

本书基于作者多年来在特种光纤及光纤通信领域的前沿研究,系统阐述了各种新型特种光纤的基本性能及其在光纤通信领域的应用。具体包括:光纤基本特性及新型制备技术;光纤无源器件;特种光纤放大器和激光器;抗弯/少模光纤在光纤通信领域的应用和发展以及特种光纤在运动无线光通信系统中的应用等。

本书可作为光纤通信、光电子技术、光学工程、仪器科学与技术、光电信息工程、测控技术与仪器等专业本科生、研究生的教材和教学参考书,也可作为特种光纤、光纤通信、光电技术等领域科技人员的技术参考书。

## 《科学专著》系列丛书序

进入 21 世纪以来,中国的科学技术发展进入到一个重要的跃升期。我们科学技术自主创新的源头,正是来自科学向未知领域推进的新发现,来自科学前沿探索的新成果。学术著作是研究成果的总结,它的价值也在于其原创性。

著书立说,乃是科学研究工作不可缺少的一个组成部分。著书立说,既是丰富人类知识宝库的需要,也是探索未知领域、开拓人类知识新疆界的需要。特别是在科学各门类的那些基本问题上,一部优秀的学术专著常常成为本学科或相关学科取得突破性进展的基石。

一个国家,一个地区,学术著作出版的水平是这个国家、这个地区科学研究水平的重要标志。科学研究具有系统性和长远性,继承性和连续性等特点,科学发现的取得需要好奇心和想象力,也需要有长期的、系统的研究成果的积累。因此,学术著作的出版也需要有长远的安排和持续的积累,来不得半点的虚浮,更不能急功近利。

学术著作的出版,既是为了总结、积累,更是为了交流、传播。交流传播了,总结积累的效果和作用才能发挥出来。为了在中国传播科学而于 1915 年创办的《科学》杂志,在其自身发展的历程中,一直也在尽力促进中国学者的学术著作的出版。

几十年来,《科学》的编者和出版者,在不同的时期先后推出过好几套中国学者的科学专著。在 20 世纪三四十年代,出版有《科学丛书》;自 20 世纪 90 年代以来,又陆续推出《科学专著丛书》、《科学前沿丛书》、《科学前沿进展》等,形成了一个以刊物名字样**科学**为标识的学术专著系列。自 1995 年起,截至 2010 年“十一五”结束,在**科学**标识下,已出版了 25 部专著,其中有不少佳作,受到了科学界和出版界的欢迎和好评。

为了继续促进中国学者对前沿工作做有创见的系统总结,“十二五”期间,《科学》的编者和出版者决定对**科学**系列学术著作做新的延伸,将**科学**

专著学术丛书扩展为三个系列品种,即《**科学**专著: 前沿研究》、《**科学**专著: 生命科学研究》、《**科学**专著: 大科学工程》,继续为中国学者著书立说尽一份力。

随着中国科学研究向世界前列的挺进,我们相信,在**科学**系列的学术专著之中,一定会有更多中国学者推陈出新、标新立异的佳作问世,也一定会有传世的名著问世!

周光召

(《科学》杂志编委会主编)

2011年5月

## 序 言

我从小就非常热衷于科学,在徐汇中学读书时,迷上了物理和天文,如饥似渴地看这方面的课外书。高考时,我填报的专业只有一个——物理。自1966年本科起至现在,长期从事红外光电子材料和器件的研究。今年初,王廷云教授将其新著《特种光纤与光纤通信》的原稿请我斧正,并为该书写序。因此,怀着好奇及钦佩的心情将原稿的各章节细品,感触良多,其将物理、光学与通信等领域相融合,立意居高,引证翔实,且绝大多数成果是由作者课题组通过实验和理论验证获得。

2015年9月,作为上海市特种光纤与光接入网重点实验室的学术委员会主任,我参加了实验室一年一度的学术委员会会议,王廷云教授就实验室近年的发展及最新科研成果等做了工作汇报,令我印象深刻。作者在该领域勤恳钻研已二十余年,不断探索特种光纤制备的新技术和新工艺,深入研究特种光纤与通信的新特性、新机理。例如,作者开展了半导体材料掺入光纤的前沿基础研究;提出了原子层沉积与化学气相沉积结合制备半导体掺杂光纤新方法;成功研制具有技术发明革新的运动光通信系统。此外,作者还积极与企业合作,推进现有科研成果的转化。这些最新成果全部毫无保留地呈现在该书中。

近年来,光纤通信的应用有目共睹,已在现代电信网中发挥了举足轻重的作用。尤其在国家相关政策重点支持下,我国光纤产业取得了巨大进步与重大突破,与其紧密相关的、具有特殊功能的,且应用于通信等领域的特种光纤和光纤器件不断涌现,已逐渐渗透到信息时代的各个行业。对于这一前沿领域的研究成果,作者进行了系统全面的介绍。

书中首先对各种新型特种光纤的基本概念、应用及发展进行了总结和简要介绍。特种光纤应用范围广,可根据信息时代各个行业的需求而量身定做。但是,特种光纤光传输的基本理论是基于光的本质,即光的折射、反射和全反射现象,以及波动光学等物理学基础。可见,物理学作为自然科学的基础,在光纤通信技术发展中起着核心作用。

其次,介绍了特种光纤的制备技术、光无源器件及特种光纤在光纤通信中的应用等。这些资料新颖,都来自作者课题组或取材于近些年国内外相关领域的最新研究成果。譬如,掺杂光纤,是在光纤中进行微量稀土元



素或半导体材料等掺杂,并基于掺杂材料的多能级结构等物理特性及独特的光学特性,实现光放大或激光器。这些器件的制造和应用是多个学科的共同结晶,但物理学在其中所起的作用不可小觑。光纤通信和物理学之间的联系非常密切,两者相辅相成,光纤通信技术的发展依赖于物理学基础,而光纤通信的发展反过来也进一步促进物理学某些领域的发展。因此,只有具备较强的物理基础,才有可能在光纤通信的研究中发挥出更大的创造性。

光纤作为 20 世纪的重大发明之一,其导光性能臻于完美,是不可取代的。在经过 21 世纪初的短暂挫折后,光纤通信近年来发展势头迅猛,为满足日益增长的信息需求,人们一直在追求更大容量、更高速和更安全的全光通信方式。目前,全光网络的发展仍然处于初期,但就光纤器件及光纤通信的发展现状和趋势来说,其涉及的范围和技术的影响力和影响面已超越其本身,势必对整个信息产业产生深远影响。通过改革和推动特种光纤核心技术,势必会消除电光瓶颈,人们所期望的全光网络时代也将会在不久的将来实现。

2015 年是国际光年,希冀此书的出版能够对特种光纤与光纤通信领域的发展起到抛砖引玉的作用,也希望王廷云教授课题组在光纤领域继续立足国内、面向国际,为我国光学事业的发展做出更大贡献! 善莫大焉!

褚君浩

2015 年 9 月

## 前 言

进入 21 世纪以来,当今社会已经进入信息时代,信息技术的快速发展离不开高效且快速的信息传递载体和技术。光纤通信技术具有传输信息容量大、抗电磁干扰强、保密性好、体积小、重量轻等特点,在通信领域具有不可替代的巨大优势,在过去短短几十年间其在世界范围内完成了推广和普及,已成为现代通信技术的重要分支,为高速、宽带的网络发展做出了重大贡献。

随着光纤通信的飞速发展,与其紧密相关的特种光纤和光纤器件不断涌现,在光纤通信中的应用范围也越来越广,如掺杂光纤、保偏光纤、光子晶体光纤、抗辐照光纤、抗弯光纤、少模光纤、传能光纤及塑料光纤等特种光纤可用于光纤无源器件、光纤放大器及激光器、光纤光缆传输、光通信模分复用等光纤通信系统。然而,特种光纤及器件在我国的发展不是一帆风顺的,在一些核心技术、关键器件及关键设备等方面还严重依赖进口。近年来,在国家有关部门和各级政府的重点支持下,国内相关企业、研究所及高校积极迎接挑战、踊跃投入,加快了具有自主知识产权的特种光纤新技术、新工艺和新材料的开发步伐,自主创新研究显著增强。

国内虽然已出版了很多有关光纤通信的书籍,但是专门介绍特种光纤及其在光纤通信中应用的书籍却偏少。因此,把特种光纤在光纤通信中的应用全面详细介绍给广大读者,更好地发挥特种光纤在光纤通信中的创新源作用,就显得十分必要。笔者长期从事特种光纤、光纤器件及光纤通信的研究工作,将多年的研究工作进行总结,希望为我国特种光纤及光纤通信的创新发展尽绵薄之力。

本书汇集了与光纤通信相关的特种光纤,基于笔者课题组的研究成果,并结合国内外相关领域的最新研究进展,对特种光纤的原理及特种光纤在光纤通信中的最新应用做较为全面的介绍,以勾勒出特种光纤与光纤通信紧密联系的轮廓。本书内容不仅覆盖了光纤通信和特种光纤的各个方面,而且融合本学科的最新技术,突出了与之相关的原理,并列举了大量的最新应用实例,贴近工程实际应用。本书有助于相关领域的科研工作者与工程技术人员了解本学科的最新前沿动态,有助于推动特种光纤技术和光纤通信技术的进一步深入研究和应用。

本书共分为 8 章。第 1 章回顾特种光纤的发展历程以及介绍特种光纤的基本原理与特性,第 2 章重点介绍特种光纤的各种制备技术,第 3、4 章分别介绍特种光纤无源光器件和非线性效应,第 5、6 章分别介绍特种光纤在光纤激光器、光纤放大器中的应用,第 7 章介绍抗弯光纤、少模光纤与光纤通信的联系,第 8 章介绍特种光纤在运动无线光通信系统中的应用。

在本书编写过程中,付兴虎博士和董艳华博士做了许多的整理、组织和汇总等工作,对本书的顺利完稿做出了重要贡献。本书的编写还得到陈振宜、曾祥龙、庞拂飞、陈娜、刘云启、文建湘、郭强、张小贝、商娅娜、赵子文等同事的大力支持,林施扬、金翔青、宫仁祥、何婷、孙欣欣等研究生做了许多文字整理工作,在此对他们表示诚挚的谢意。

感谢国家自然科学基金重点项目(No. 60937003)的支持,也感谢国家科学技术学术著作出版基金、上海科技专著出版资金和上海科学技术出版社的大力支持!

希望本书能够对高等院校光通信、光电子技术、光学工程、仪器科学与技术等专业高年级本科生、研究生以及相关专业领域的科研人员和工程技术人员有所帮助。

鉴于著者的水平所限,书中难免还存在一些不足,殷切希望广大读者批评指正。



2015 年 4 月

## 《科学专著》系列丛书序

## 序言

## 前言

第 1 章 绪论 .....	1
§ 1.1 特种光纤的定义和分类 .....	1
§ 1.2 特种光纤的研究进展 .....	2
1.2.1 掺稀土光纤 .....	2
1.2.2 掺半导体光纤 .....	3
1.2.3 保偏光纤 .....	3
1.2.4 抗辐射光纤 .....	4
1.2.5 光子晶体光纤 .....	5
1.2.6 少模光纤 .....	6
1.2.7 包层模谐振光纤 .....	6
1.2.8 传能光纤 .....	7
1.2.9 微纳光纤 .....	7
1.2.10 塑料光纤 .....	8
1.2.11 其他新型特种光纤 .....	9
§ 1.3 光纤传输的基本理论 .....	9
1.3.1 子午线传输特性 .....	10
1.3.2 斜光线传输特性 .....	11
1.3.3 波动方程 .....	11
1.3.4 模式分类 .....	13
§ 1.4 光纤的特性 .....	18
1.4.1 截止波长 .....	19
1.4.2 光纤的损耗 .....	19
1.4.3 光纤的色散 .....	20
§ 1.5 特种光纤的发展趋势 .....	21
参考文献 .....	23
第 2 章 特种光纤的制备技术 .....	27
§ 2.1 一次特种光纤制备技术 .....	27
2.1.1 常规光纤制备技术 .....	27
2.1.2 基于 MCVD 的 InP 薄膜内包层光纤制备 .....	31

2.1.3 基于 MCVD 和溶液浸泡法的掺铋光纤制备 .....	32
2.1.4 基于 MCVD 和溶胶-凝胶法的纳米量子点放大光纤制备 .....	32
2.1.5 基于 MCVD 和 ALD 技术的掺杂特种光纤制备 .....	34
2.1.6 紫外光纤制备 .....	39
§ 2.2 二次特种光纤制备技术 .....	39
2.2.1 相位掩模法制作光纤布拉格光栅 .....	40
2.2.2 CO <sub>2</sub> 激光技术制作长周期光纤光栅 .....	43
2.2.3 光纤法布里-珀罗腔的制备 .....	48
参考文献 .....	55
<b>第 3 章 特种光纤无源光器件 .....</b>	<b>60</b>
§ 3.1 光纤滤波器 .....	60
3.1.1 光纤光栅滤波器 .....	60
3.1.2 F-P 光纤滤波器 .....	64
3.1.3 M-Z 光纤滤波器 .....	65
3.1.4 Michelson 光纤滤波器 .....	65
3.1.5 Sagnac 光纤滤波器 .....	66
3.1.6 光子晶体光纤滤波器 .....	67
3.1.7 双包层光纤滤波器 .....	68
§ 3.2 光纤耦合器 .....	71
3.2.1 保偏光纤耦合器 .....	72
3.2.2 光子晶体光纤耦合器 .....	73
3.2.3 塑料光纤耦合器 .....	74
§ 3.3 光纤偏振器 .....	74
§ 3.4 光纤波分复用器 .....	75
§ 3.5 光纤连接器 .....	76
§ 3.6 光纤色散补偿器 .....	78
3.6.1 色散补偿光纤 .....	78
3.6.2 光纤光栅色散补偿器 .....	78
3.6.3 光子晶体光纤色散补偿器 .....	79
参考文献 .....	81
<b>第 4 章 特种光纤非线性效应 .....</b>	<b>85</b>
§ 4.1 掺杂光纤非线性效应 .....	85
4.1.1 掺铟光纤 .....	86
4.1.2 高掺铈非线性光纤 .....	86
4.1.3 硫系光纤 .....	87

4.1.4 掺磷光纤 .....	88
§ 4.2 保偏光纤非线性效应 .....	88
§ 4.3 光子晶体光纤非线性效应 .....	90
4.3.1 脉冲压缩 .....	91
4.3.2 超连续谱产生 .....	91
4.3.3 全光波长转换 .....	92
§ 4.4 特种光纤拉曼散射效应 .....	93
§ 4.5 特种光纤非线性折射率系数 .....	95
4.5.1 干涉法测量光纤共振非线性的原理 .....	95
4.5.2 掺铋光纤非线性折射率系数 .....	97
4.5.3 掺铊光纤非线性折射率系数 .....	99
4.5.4 掺铟光纤非线性折射率系数 .....	101
4.5.5 共振非线性测量的影响因素分析 .....	102
参考文献 .....	104
<b>第 5 章 特种光纤与光纤激光器 .....</b>	<b>108</b>
§ 5.1 掺稀土光纤激光器 .....	108
5.1.1 掺铟光纤激光器 .....	109
5.1.2 掺镱光纤激光器 .....	114
5.1.3 其他掺稀土光纤激光器 .....	116
§ 5.2 双包层光纤激光器 .....	116
5.2.1 LD 泵浦掺 $\text{Yb}^{3+}$ 双包层光纤激光器 .....	118
5.2.2 连续波铽共掺双包层光纤激光器 .....	118
5.2.3 调 Q 双包层光纤激光器 .....	119
5.2.4 锁模双包层光纤激光器 .....	120
5.2.5 双包层光纤光栅多波长光纤激光器 .....	120
§ 5.3 保偏光纤激光器 .....	121
5.3.1 锁模保偏光纤激光器 .....	121
5.3.2 双包层保偏光纤激光器 .....	122
5.3.3 保偏光纤光栅激光器 .....	122
5.3.4 调频窄线宽保偏光纤激光器 .....	123
§ 5.4 光子晶体光纤激光器 .....	124
5.4.1 可调谐光子晶体光纤激光器 .....	124
5.4.2 光子晶体光纤拉曼激光器 .....	125
5.4.3 掺 $\text{Yb}^{3+}$ 双包层光子晶体光纤激光器 .....	125
5.4.4 线偏振短脉冲光子晶体光纤激光器 .....	126
5.4.5 基于光子晶体光纤 M-Z 干涉仪的可调谐光纤激光器 .....	126

参考文献 .....	128
<b>第 6 章 特种光纤与光纤放大器 .....</b>	<b>132</b>
§ 6.1 掺稀土光纤放大器 .....	132
6.1.1 掺铒光纤放大器 .....	133
6.1.2 掺镱光纤放大器 .....	138
6.1.3 掺铊光纤放大器 .....	140
6.1.4 掺镨光纤放大器 .....	143
§ 6.2 双包层光纤放大器 .....	145
6.2.1 双包层掺稀土光纤放大器 .....	145
6.2.2 单频双包层光纤放大器 .....	146
6.2.3 脉冲双包层光纤放大器 .....	147
§ 6.3 光子晶体光纤放大器 .....	148
6.3.1 偏振保持窄线宽光子晶体光纤放大器 .....	149
6.3.2 高功率光子晶体光纤放大器 .....	149
§ 6.4 聚合物光纤放大器 .....	150
6.4.1 掺杂有机染料的 POFA .....	151
6.4.2 掺杂稀土螯合物的 POFA .....	151
§ 6.5 渐逝波耦合半导体量子点光纤放大器 .....	152
6.5.1 半导体量子点放大光纤的理论仿真 .....	153
6.5.2 半导体量子点放大光纤的制备技术 .....	158
6.5.3 放大光纤的制作及测试 .....	160
§ 6.6 拉曼光纤放大器 .....	161
6.6.1 基于 FBG 的 EDFA /RFA 混合光纤放大器 .....	161
6.6.2 基于高非线性光纤的拉曼光纤放大器 .....	161
6.6.3 光子晶体光纤拉曼光纤放大器 .....	163
参考文献 .....	165
<b>第 7 章 抗弯/少模光纤与光纤通信 .....</b>	<b>169</b>
§ 7.1 抗弯光纤与光纤通信 .....	169
7.1.1 抗弯光纤的基本特性 .....	170
7.1.2 抗弯光纤的制备方法 .....	171
7.1.3 抗弯光纤与光纤到户 .....	174
7.1.4 抗弯光纤与高速数据传输 .....	176
§ 7.2 少模光纤与光纤通信 .....	178
7.2.1 少模光纤的基本特性 .....	178
7.2.2 少模光纤的设计和制备 .....	179

7.2.3 少模光纤光栅 .....	182
7.2.4 少模光纤模分复用 .....	184
参考文献 .....	188
<b>第 8 章 特种光纤与运动无线光通信 .....</b>	<b>192</b>
§ 8.1 运动无线光通信 .....	192
§ 8.2 基于特种光纤的无线光通信 .....	193
8.2.1 特种实心耦合光锥 .....	193
8.2.2 光束发散角可调的球面单透镜式光发射天线 .....	197
8.2.3 单透镜光锥耦合式光接收天线 .....	198
8.2.4 直线运动无线光通信系统 .....	199
8.2.5 典型应用 .....	199
§ 8.3 基于特种光纤的旋转连接光通信 .....	200
8.3.1 单通道光纤旋转连接器 .....	201
8.3.2 基于特种光锥的光纤旋转连接器 .....	202
8.3.3 多通道光传输准直型光纤旋转连接器 .....	203
8.3.4 典型应用 .....	207
§ 8.4 波分复用光纤旋转连接技术 .....	208
参考文献 .....	211
<b>索引 .....</b>	<b>214</b>



# 第 1 章

## 绪 论

光纤通信系统是指利用光作为信息的载波,并通过光纤来传递信息的通信系统。20世纪70年代开始,光纤通信技术发展迅速,光纤通信已成为当今社会最重要的通信手段。光纤作为光纤通信的传输介质,主要具有以下优点:

- (1) 直径小、质量轻、质地细柔、易弯曲。
- (2) 载波频率高、高速、宽带、通信容量大。
- (3) 基质材料为石英,来源丰富,可节约大量的金属材料,绿色环保。
- (4) 抗电磁干扰能力强。

随着三网融合、4G、5G、FTTx、多维通信模式以及 IPv6 等新一代信息技术和国家战略的不断推进,国内外对常规通信光纤的需求激增,光纤已成为通信市场最为重点关注的商品之一。而具有特殊性能的特种光纤(specialty fiber)以及由特种光纤制成的具有特殊功能的光纤器件,也逐渐受到青睐。品种繁多的特种光纤层出不穷,推动光纤通信进一步发展。目前,光纤通信已在工业、航空航天、军事国防、生物医学等领域发挥着不可替代的重要作用。

### § 1.1 特种光纤的定义和分类

特种光纤是除常规通信光纤以外的具有特殊功能的各类光纤的总称。特种光纤可从以下几个角度进行分类:

- (1) 根据制备技术,可分为一次特种光纤和二次特种光纤。一次特种光纤是以光纤预制棒为基础直接拉制而成的,如掺稀土光纤、光子晶体光纤、塑料光纤、纳米光纤等;二次特种光纤是经过二次加工制成的,如光纤光栅、敏感涂层光纤、锥形光纤等。
- (2) 根据光纤材料,可分为掺稀土光纤、塑料光纤、液芯光纤和半导体材料掺杂光纤等。
- (3) 根据传输光波长,可分为紫外光纤、中红外光纤、远红外光纤等。
- (4) 根据内部结构,可分为液芯光纤、空芯光纤、多芯光纤、光子晶体光纤、多包层光纤等。